

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.005

面向复杂情景的 SWMM 水质参数敏感性分析

王 鹏¹, 董国庆¹, 阴祖荣², 陈美丹³, 金文龙³, 戴向荣⁴

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 江苏海环环境科学研究院有限公司, 江苏 南京 210098;

3. 苏州市环境科学研究所, 江苏 苏州 215011; 4. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 为了研究多种降雨情景下不同下垫面类型的水质参数敏感性, 采用修正 Morris 筛选法解析了 SWMM 的水质参数敏感性总体特征, 阐明了不同降雨强度和下垫面类型对水质参数敏感性的影响程度, 揭示了各水质指标的高敏感参数分异特征。结果表明: 高敏感及敏感参数数量及敏感性随降雨强度增大而增加, 暴雨条件下道路和绿地水质参数敏感性水平显著升高, 而降雨峰现时间滞后会导致部分高敏感水质参数的敏感性降低, 敏感性从高到低依次为径流指数、最大积累量、冲刷系数、速率常数、半饱和常数; 下垫面类型对高敏感及敏感水质参数数量的影响程度高于降雨条件; 屋顶的敏感性参数数量及其敏感性总体较大, 主要受下垫面面积占比和透水性影响, 农田氮氮的径流指数敏感性显著高于化学需氧量、总磷、总氮, 与肥料水解及氮氮流失过程有关。

关键词: 城市雨洪模型; 水质参数; 敏感性分析; 下垫面; 径流指数; Morris 筛选法; SWMM

中图分类号: X32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)05-0031-07

Sensitivity analysis of water quality parameters in SWMM for complex scenarios

WANG Peng¹, DONG Guoqing¹, YIN Zurong², CHEN Meidan³, JIN Wenlong³, DAI Xiangrong⁴

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lake of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Hohai Academy of Environmental Science Co., Ltd., Nanjing 210098, China;

3. Suzhou Institute of Environmental Science, Suzhou 215011, China;

4. POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to study the sensitivity of water quality parameters of different underlying surface types under various rainfall scenarios, the modified Morris screening method was used to analyze the overall characteristics of water quality parameters sensitivity of the SWMM, clarify the influence degree of different rainfall intensity and underlying surface types on water quality parameter sensitivity, and reveal the differentiation characteristics of highly sensitive parameters of each water quality index. The results show that the number of highly sensitive and sensitive parameters and sensitivity increase with increasing rainfall intensity, and the sensitivity level of water quality parameters for road and grassy area significantly elevated under rainstorm condition, however, the time lag of rainfall peak will reduce the sensitivity of some highly sensitive water quality parameters. In terms of sensitivity, the parameters are runoff index, maximum accumulation, washoff coefficient, rate constant and half-saturation constant in descending order. The significance tests show that the influence degree of underlying surface types on the number of highly sensitive and sensitive parameters is higher than that of rainfall conditions. The number of sensitivity parameters and their sensitivity for roof are generally large, mainly affected by the area proportion and permeability of underlying surfaces. The sensitivities of runoff exponents of ammonia nitrogen for farmland are significantly higher than COD, TP and TN, which is related to the process of fertilizer hydrolysis and ammonia nitrogen loss.

Key words: urban storm water model; water quality parameter; sensitivity analysis; underlying surface; runoff exponent; Morris screening method; SWMM

随着我国经济社会的迅猛发展与城镇化水平快速提高^[1-2], 城市各类建筑、道路等不透水下垫面面积占

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2040209); 江苏省水利科技项目(2022034)

作者简介: 王鹏(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事污染物迁移归趋机理与水环境数值模拟研究。E-mail: hhw@hhu.edu.cn

引用本文: 王鹏, 董国庆, 阴祖荣, 等. 面向复杂情景的 SWMM 水质参数敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 31-37.

WANG Peng, DONG Guoqing, YIN Zurong, et al. Sensitivity analysis of water quality parameters in SWMM model for complex scenarios [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 31-37.

比迅速上升,逐渐侵占了农田、绿地和水域等透水性下垫面,导致径流汇流时间缩短,管网排水压力增大,城市极端洪涝灾害事件频发。此外,不合理的城市规划以及人类活动加剧,城镇地表径流污染负荷显著增加,导致黑臭水体等各类城市水环境问题日益突出,严重影响了人民群众的生活幸福感,已成为制约我国城市社会经济可持续发展的核心问题^[3]。

SWMM 是由美国环境保护署开发的一款动态降水-径流模拟模型,主要用于模拟城市单一降水事件或长期水量和水质问题^[4]。其径流模块部分综合处理各子流域所发生的降水、径流和污染负荷,汇流模块部分则通过管网、渠道、蓄水和处理设施、泵、闸等进行水量传输。该模型可以跟踪模拟不同时间步长任意时刻每个子流域所产生径流的水质和水量,以及管道和河道中的流量、水深及水质等情况,被广泛应用于智慧水利及数字孪生流域建设,城市洪涝治理及排水系统规划、分析和设计,城市水环境综合整治方案治理效果评估,低影响开发措施的水量水质调控效果模拟等领域^[5-7]。

SWMM 水文水力模块参数的局部敏感性研究表明,不透水率是影响径流深的高敏感性参数,管道曼宁糙率与不透水区百分比是影响峰值流量最灵敏的参数,雨强对于模型水文水力模块参数的灵敏度影响较大^[8]。此外,全局灵敏度分析发现,透水区参数灵敏度在雨强较小的情况下很小,在较强降雨情况下,管道曼宁系数是决定峰值流量与峰值发生时间的关键参数^[9]。郭凤等^[10]的研究表明,径流总量的参数敏感性因降雨强度的不同而存在一定的差异性。

综上,目前国内外在 SWMM 参数敏感性研究领域,多聚焦于水文参数及水力参数的敏感性分析,对水质参数敏感性问题研究较少。此外,相关研究通常基于特定降雨事件或下垫面类型,对不同降雨强度、下垫面水质指标的参数敏感性分析不够深入。因此,本文以沅江市为研究区,选取 COD、氨氮、总氮和总磷作为代表性水质指标,计算了小雨、中雨、大雨及暴雨情景下不同下垫面类型各水质参数的敏感性,阐明了不同降雨强度的水质参数敏感性分布特征,揭示了敏感水质参数数量及敏感程度对绿地、道路、屋顶和农田 4 种下垫面类型及水质指标的响应机制。

1 研究区概况

沅江市隶属于湖南省益阳市,地处湖南省东北部、益阳市北部,是典型的湖滨市域经济单元。全市地势变化较为平缓,整体西高东低,北为冲积平原堤垸区,海拔 26 m 以上,西部为丘陵,总面积 2 177 km²。该市地处中亚热带向北亚热带过度的大陆性季风湿润气候区,具有湖区气候特色,冬冷夏热、四季分明、阳光充足、雨水较多。平均气温 16.9℃,年平均日照数 1 743.5 h,年平均降水量 1 319.8 mm,多集中在 4—6 月。沅江城区南、北、东分别为资江、沅江和南洞庭湖缠绕,整个城区如同一个半岛伸入南洞庭湖,城区内分布着浩江湖、蓼叶湖、上琼湖、下琼湖和石矶湖 5 个湖泊,水质差异性较大,与沅水相连的浩江湖水质相对较好,各断面水质均能达到 III 类,上琼湖、下琼湖和石矶湖流经城市主要功能区,水质相对较差,其中下琼湖水质最差,多个断面为劣 V 类,主要超标因子为总氮,其他内湖水质为 IV 类或 V 类。

2 研究方法

2.1 敏感性分析方法

局部敏感性分析方法操作简单,适用性强,可以准确识别出对模型输出结果影响较大的参数,修正 Morris 筛选法是局部敏感性分析中普遍应用的一种敏感性分析方法^[11]。Morris 筛选法以单个参数作为分析对象,在保证其他参数取值不变的情况下,对参数在合理的取值范围内按照固定的取值步长进行变动,随后输入模型并输出模拟结果,分析参数多次变动对结果的影响,得出敏感性指标。本文采用该方法进行模型参数敏感性分析。

参数敏感性程度判别采用 Knighton 等^[12]提出的分级标准,当敏感性指标 S 的绝对值 $|S| \geq 1$ 时,参数为高敏感参数;当 $0.2 \leq |S| < 1$ 时,参数为敏感参数;当 $0.05 \leq |S| < 0.2$ 时,参数为中敏感参数;当 $0 \leq |S| < 0.05$ 时,参数为不敏感参数。

2.2 模型构建

2.2.1 模型概化

构建 SWMM 需要获取管网系统的管点高程、偏移量、深度、管线起点、终点、长度、管径等基础数据^[13],

但是市政管网管线长度长,管点数量多,如果将这些数据全部用于模型构建,不仅建模工作量巨大,而且模型运算效率很低,预测精度增加有限。因此,需要先对管网系统进行概化处理。通过分析沅江市政管网设计图,并进行实地踏勘核实,研究区共有12 802个管点和12 576条市政管线。经概化处理,选取管点 943 个,管线1 044 条,如图 1 所示。

研究区为沅江市市政管网覆盖的城区范围,将下垫面类型分为屋顶、道路、绿地和农田 4 种,利用“全国地理信息资源目录服务系统”提供的 GlobeLand30 数据集生成下垫面分布状况,该数据集是全球首套 30 m 分辨率全球地表覆盖数据集,包含了更加丰富详尽的全球地表覆盖空间分布信息,能更好地刻画大多数人类土地利用活动及其所形成的景观格局。由于该数据集没有区分屋顶和道路,采用 GIS 软件进行手工划分。经过统计,研究区总面积 40.76 km²,其中屋顶、道路、绿地和农田面积分别为 16.31、8.56、5.7、10.19 km²,占比分别为 40%、21%、14%和 25%。

2.2.2 模型参数取值

SWMM 水力模块是对降雨径流进入管网节点后的输送过程进行模拟,提供了恒定流、运动波、动力波 3 种演算方法^[14]。结合研究区域自然状况,选取霍顿下渗公式进行模拟计算,需要确定的参数包括最大入渗速率、最小入渗速率和入渗衰减系数,根据子汇水区下垫面类型的不同,除屋顶外,最大下渗速率取值范围为 10~80 mm/h,最小下渗速率取值范围为 2~7 mm/h,下渗衰减系数为 1~5/h。利用 2020 年 6 月 30 日实测降雨及流量数据,在取值范围内对各下垫面类型的最大入渗速率、最小入渗速率和入渗衰减系数等水文参数进行了率定。经过统计,管网各排口流量过程预测结果与实测结果的相对误差平均值均小于 6.5%。经过率定的各下垫面类型水力参数取值见表 1。

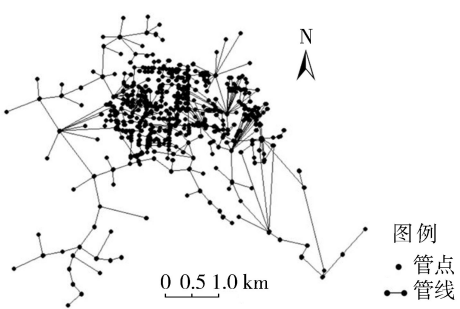


图 1 沅江市政管网管点概化

Fig. 1 Generalized diagram of pipe network and nodes for Yuanjiang City

表 1 各下垫面类型水力参数取值

Table 1 Hydraulic parameter values for each underlying surface type					
下垫面类型	注蓄深度/mm	不透水比例/%	最大下渗速率/(mm/h)	最小下渗速率/(mm/h)	下渗衰减系数/(1/h)
绿地	5.08	10	77.74	7	4
道路	1.3	80	17.13	3	3.18
屋顶	2.1	100	0	0	0
农田	3.12	30	34.72	6.6	3.28

水质模型分为累积模块和冲刷模块两部分^[15],需要分别设置不同下垫面类型的累积参数和冲刷参数。如前所述,研究区被划分为道路、绿地、农田和屋顶 4 种下垫面类型,选取 COD、总磷、总氮和氨氮 4 种水质指标作为预测对象,共计 84 个水质参数。由于水质参数的初始取值随研究区气候与地理环境不同而存在较大差异,因此,通过查阅模型手册、总结前人研究成果并结合研究区气候条件及环境特征,先确定各水质参数的取值范围,然后以中间值作为初始值,采用修正 Morris 筛选法对各参数以±10% 的步长进行变动,以管网各排口污染物峰值浓度的平均值作为目标值,计算敏感性指标 S。各参数取值范围见表 2。

表 2 SWMM 水质参数取值范围

Table 2 Value ranges of water quality parameters for SWMM

下垫面类型	最大积累量/(kg/hm ²)				速率常数/(1/d)				半饱和常数/d	
	COD	总磷	总氮	氨氮	COD	总磷	总氮	氨氮	COD	总磷
道路	180~220	0.9~1.3	4~10	2~6	0.5~0.9	0.06~0.1	0.1~0.5	0.1~0.5	8~12	8~12
绿地	20~60	0.5~0.9	2~6	1~1.5	0.2~0.6	0.05~0.13	0.1~0.5	0.1~0.5	8~12	8~12
屋顶	80~120	0.5~0.9	2~6	1.1~1.5	0.3~0.7	0.05~0.13	0.1~0.5	0.3~0.7	8~12	8~12
农田	60~100	0.5~0.9	2~6	4~8	0.2~0.6	0.05~0.13	0.1~0.5	0.1~0.4	8~12	8~2
下垫面类型	半饱和常数/d		冲刷系数				径流指数			
	总氮	氨氮	COD	总磷	总氮	氨氮	COD	总磷	总氮	氨氮
道路	8~12	8~12	0.007~0.011	0.005~0.009	0.005~0.009	0.001~0.005	1.4~1.8	1.5~1.9	1.5~1.9	1.5~1.9
绿地	8~12	8~12	0.002~0.006	0.001~0.0019	0.001~0.0019	0.001~0.0019	1.2~1.6	1.2~1.6	1.2~1.6	1.~1.6
屋顶	8~12	8~12	0.003~0.007	0.002~0.006	0.002~0.006	0.003~0.007	1.4~1.8	1.5~1.9	1.5~1.9	1.5~1.9
农田	8~12	8~12	0.002~0.006	0.001~0.0019	0.001~0.0019	0.003~0.007	1.2~1.6	1.2~1.6	1.2~1.6	1.5~1.9

2.2.3 降雨情景设置

结合沅江市暴雨强度公式(式(1))和芝加哥雨型法,分别生成雨峰系数为 0.3、0.6、0.7、0.5,降雨历时 2 h 的 4 组降雨强度过程线,降水量分别为 9.1、24.8、49.8、80.1 mm,按照降雨级别划分标准,作为典型小雨(<10 mm)、中雨(10 ~ <25 mm)、大雨(25 ~ <50 mm)及暴雨(50 ~ 100 mm)过程。4 场降雨情景具有不同的降雨强度和峰值出现时间,可以体现研究区降雨事件的随机特征,能够全面检验不同降雨条件下 SWMM 水质参数的敏感性。

$$i = (14.7509 + 13.3897 \lg T) / (t + 16.7562)^{0.7679}$$

(1)

式中: i 为降雨强度; T 为重现期; t 为降雨历时。

3 结果与分析

3.1 水质参数敏感性总体特征

依据参数敏感性分类标准,按照降雨强度将高敏感及敏感水质参数数量分类汇总,并采用 ANOVA 方差分析对参数数量的差异进行显著性检验,结果见表3。由表3可知,除小雨外,高敏感及敏感参数数量随降雨强度增大而增加,这是因为部分水质参数敏感性随着雨强增大而增加,由不敏感参数转为敏感参数,甚至是高敏感参数。同时,不同水质指标的敏感性参数数量变化趋势存在差异,其中氨氮、总氮和总磷的高敏感及敏感参数数量与整体变化趋势一致,而 COD 高敏感及敏感参数数量随降雨强度增大呈现先增加后减少的趋势。然而,显著性检验结果表明,不同降雨强度的高敏感及敏感参数数量之间不存在显著差异($p>0.05$)。

此外,按下垫面类型对不同降雨强度下的高敏感及敏感水质参数数量进行统计,并对其差异进行显著性检验,结果见表4。由表4可知,屋顶的高敏感参数及敏感参数最多,达到 41 个,其次为道路、农田,绿地最少,仅为12 个。敏感性最高的参数是屋顶总磷径流指数,其敏感性从小雨到暴雨分别为 1.60、1.78、3.24 和 3.32(随降雨强度增加而增大),但是 COD、总氮和氨氮屋顶径流指数的敏感性均以中雨为最低,与中雨的雨峰系数较高(0.6)有关,说明降雨的峰现时间滞后会导致部分高敏感水质参数的敏感性降低。显著性检验表明,屋顶和道路的高敏感参数数量与绿地和农田存在显著性差异($p<0.05$),屋顶的敏感参数个数与绿地存在显著性差异($p<0.05$),这与张胜杰等^[16]的研究结论相符,说明下垫面类型对高敏感水质参数数量的影响程度高于降雨强度,需要在模型构建过程仔细核实与校验研究区的下垫面空间分布状况,降低参数估值不准确带来的误差。

3.2 降雨条件对水质参数敏感性的影响

由前面分析可知,敏感水质参数个数与降雨条件有关,为了进一步分析不同降雨条件下水质参数的敏感性特征,按降雨强度大小分别对 4 种下垫面类型各项水质指标的水质参数敏感性进行分类汇总,绘制小提琴图,如图 2 所示(图中空心圆点代表敏感性大小,空心圆点分布宽度表示数据频次高低)。由图 2 可知,水质参数敏感性大小顺序为径流指数、最大积累量、冲刷系数、速率常数、半饱和常数,且径流指数敏感性显著高于其他指标,这与影响排口污染物浓度的累积过程和冲刷过程直接相关。本文采用饱和函数预测地表污染物累积速率,采用指数冲刷模拟污染物冲刷过程:

$$m_B(t_d) = B_{\max} t_d / (K_B + t_d)$$

(2)

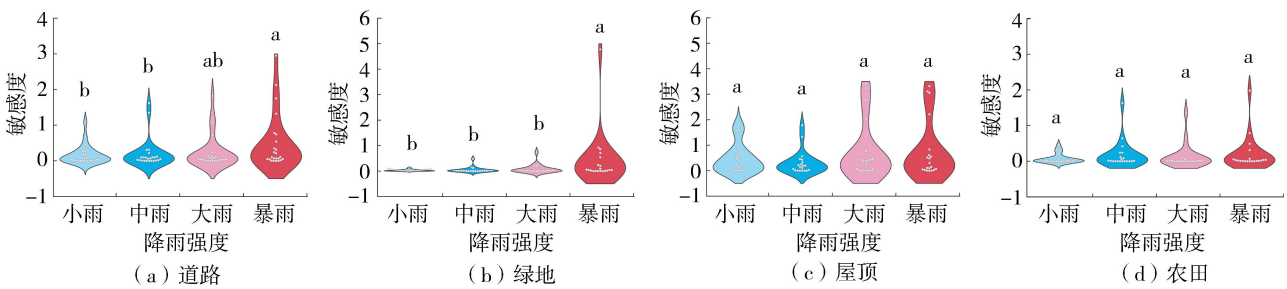


图 2 不同下垫面类型水质参数敏感性分布特征

Fig.2 Sensitivity distribution characteristics of water quality parameters under different underlying surface types

$$w = K_w q^{N_w} m_B(t_d) \tag{3}$$

式中： m_B 为单位面积的污染物积累量； t_d 为累积时间； B_{max} 为污染物最大积累量； K_B 为累积过程的半饱和常数； w 为单位时间的污染物冲刷量； K_w 为冲刷系数； q 为径流速率； N_w 为径流指数。

由式(2)可知,污染物积累量与最大积累量的一次方成正比,意味着积累量随最大积累量增加呈线性增加趋势。由式(3)可知,在相同降雨条件下,被降雨径流冲刷进入管网的污染负荷及相应的污染物浓度随污染物积累量增加也呈线性增加趋势。与最大积累量相比,污染物积累量与半饱和常数成反比,但是,在相同的参数取值变化条件下,污染负荷及浓度的变化幅度小于最大积累量。因此,最大积累量的敏感性高于半饱和常数。由式(3)可知,径流指数位于公式的指数项,其对污染物冲刷量的影响程度显著高于冲刷系数,因此径流指数的敏感性高于冲刷系数。

水质参数敏感性总体随降雨强度增大呈增加趋势。与其他降雨条件相比,暴雨条件下道路和绿地水质参数敏感性水平显著升高($p<0.05$),小雨到大雨条件下道路和绿地的参数敏感性分布的变化程度有限。不同降雨条件下,屋顶和农田的水质参数敏感性分布不存在显著差异($p>0.05$),不同降雨强度下水质参数敏感性对屋顶和农田的响应关系存在分异特性。小雨、中雨、大雨及暴雨的雨峰系数分别为 0.3、0.6、0.7、0.5,从各降雨条件的水质参数敏感性分布特征看,敏感性大小总体与雨峰系数无关。

水质参数敏感性随降雨强度的总体变化趋势与敏感参数个数相似,其中暴雨条件下道路和绿地的水质参数敏感性与其他降雨强度差异明显,而各种降雨强度下屋顶和农田的水质参数敏感性差异不明显。对于屋顶,可能是由于其累积的污染物在较小的降雨量下即被冲刷殆尽,限制了水质参数敏感性的进一步增加;对于农田,小雨条件下的参数敏感性较低,但与其他降雨条件的参数敏感性不存在显著差异,说明这 2 种下垫面的水质参数敏感性大小与降雨强度的关联不明显,与污染物来源及其流失特征有关。

3.3 不同下垫面类型的水质参数敏感性特征

为了进一步解析水质参数敏感性与下垫面类型的关系,将各下垫面类型的高敏感及敏感参数的敏感性绘制成柱状图,如图 3 所示。图 3 中柱体表示各参数敏感性的平均值,内部的横线代表敏感性的中位数,上下的短横线代表敏感性的标准差;绿地中雨中上标注 ns 表示中雨条件下只有 1 个敏感参数,无法进行显著性差异分析。

由图 3 可知,不同降雨条件下屋顶的参数敏感性平均值最大,达到 1.06,其次是道路、绿地和农田,分别为 0.86、0.72 和 0.66。根据李美水等^[17]的研究,下垫面面积与水质参数敏感性具有一定关联。据统计,研究区屋顶面积占比最高,达到 40%,说明下垫面面积的确对水质参数敏感性有较大影响。道路与农田的面积占比分别为 21% 和 25%,占比相当,但是道路的高敏感及敏感参数数量及其敏感性高于农田,这是因为农田透水性明显高于道路,对降雨径流的下渗作用和污染物削减作用更强,因此对水质参数敏感性的影响没有道路大^[18]。

此外,不同下垫面类型敏感性最高的参数均为径流指数,且径流指数敏感性排序为屋顶、道路、绿地、农田,与各参数敏感性平均值排序相同。通过统计各降雨强度参数敏感性平均值的标准差发现,绿地水质参数

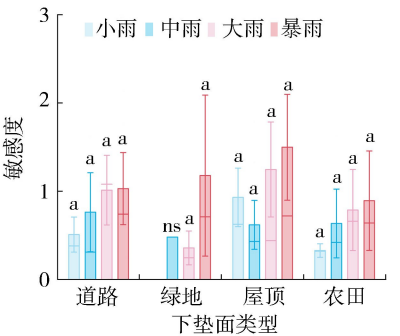


图 3 不同下垫面类型的水质参数敏感性特征

Fig.3 Sensitivity characteristics of water quality parameters under different underlying surface types

敏感性的离散程度最大,其次为屋顶,道路最小。但是显著性检验表明,各种下垫面类型之间及某种下垫面不同降雨强度之间的水质参数敏感性没有显著差异。

3.4 各水质指标的高敏感参数分异特征

由于屋顶的高敏感性参数个数显著多于其他 3 种下垫面类型,同时,农田施肥对不同水质指标的影响程度存在差异,因此选择屋顶和农田作为探讨各水质指标高敏感参数分异特征的下垫面类型。与其他水质参数相比,径流指数是所有下垫面类型敏感性最高的水质参数,因此将 4 种水质指标径流指数的敏感性特征值列于表 5,并进行显著性水平检验。

由表 5 可知,不同降雨条件下屋顶各水质指标的径流指数敏感性均较大,排序为:总磷>总氮> COD>氨氮,其中总磷径流指数的敏感性从小雨到暴雨分别为 1.6、1.78、3.24 和 3.32,但是各水质指标间的径流指数敏感性不存在显著差异($p>0.05$)。根据马勇等^[19]的研究,屋顶径流中的总磷主要来自降雨,说明径流总磷浓度受降雨影响较大,导致总磷径流指数的敏感性随降雨强度增加而增大,而当降雨强度达到大雨量级时,径流指数敏感度趋于稳定。

与屋顶相反,农田径流中 COD、总磷、总氮的径流指数敏感性很低,且随着降雨强度的增加几乎没有变化,而氨氮的径流指数敏感性显著高于这 3 个指标($p<0.05$),且中雨、大雨及暴雨的参数敏感性高于小雨。农田各水质指标的径流指数敏感度呈现明显分异特征,是因为不同降雨条件下随农田径流流失的 COD、总磷、总氮等污染物平均浓度变化不大,甚至出现污染物平均浓度随降雨强度增加而减小的现象,导致参数敏感性降低^[20]。此外,根据李佳韵^[21]的研究,化肥水解导致农田土壤的氨氮含量快速增加,降雨初期土壤中的氮素会随着径流大量流出,氨氮浓度随降雨强度增大迅速上升,然而,随着降雨持续增强,土壤氮素不断被淋洗至深层,加之径流的稀释作用,浓度变化趋于平缓,因此,参数敏感性逐渐稳定。

4 结 论

a. 除小雨外,高敏感及敏感参数数量随降雨强度增大而增加,但是不同降雨条件的高敏感及敏感参数数量之间不存在显著差异;参数敏感性排序为径流指数、最大积累量、冲刷系数、速率常数、半饱和常数;不同下垫面类型的敏感性参数数量排序为屋顶>道路>农田>绿地,下垫面类型对高敏感水质参数数量的影响高于降雨强度;降雨的峰现时间滞后会导致部分高敏感水质参数的敏感性降低。

b. 水质参数敏感性总体随降雨强度增大呈增加趋势,与其他降雨条件相比,暴雨条件下道路和绿地水质参数敏感性水平显著升高,不同降雨条件下屋顶和农田的水质参数敏感性分布不存在显著差异,说明这 2 种下垫面的水质参数敏感性大小与降雨强度的关联不明显,与污染物来源及其流失特征有关。

c. 不同降雨条件下屋顶的参数敏感性总体较大,道路的高敏感及敏感参数数量及其敏感性高于农田,与下垫面面积占比和透水性直接相关;各种下垫面类型之间及某种下垫面不同降雨强度之间的水质参数敏感性没有显著差异。

d. 各种降雨条件下屋顶各水质指标的径流指数敏感性均较大,其中总磷的径流指数敏感性整体最高,从小雨到暴雨分别为 1.6、1.78、3.24 和 3.32,但是,各水质指标间的径流指数敏感性不存在显著差异;而农田氨氮的径流指数敏感性显著高于 COD、总磷、总氮,与肥料水解及氨氮随径流流失的时间过程有关。

参考文献:

[1] 国家统计局. 2021 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2022-02-28] http://www.gov.cn/xinwen/2022-02/28/content_5676015.htm.
[2] 中国共产党中央委员会. 长江三角洲区域一体化发展规划纲要[M]. 北京:人民出版社,2019.
[3] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in

表 5 各水质指标径流指数敏感性特征
Table 5 Sensitivity characteristics of runoff exponents for various water quality indexes

降雨强度	屋顶				农田			
	COD	总磷	总氮	氨氮	COD	总磷	总氮	氨氮
小雨	1.58 ^a	1.60 ^a	1.81 ^a	0.80 ^a	0.01 ^{ab}	0.07 ^{ab}	0.02 ^{ab}	0.46 ^{ab}
中雨	1.35 ^b	1.78 ^b	0.57 ^b	0.43 ^b	0 ^b	0.02 ^b	0.01 ^b	1.63 ^b
大雨	2.76 ^a	3.24 ^a	3.42 ^a	2.03 ^a	0.01 ^a	0.06 ^a	0.01 ^a	1.37 ^a
暴雨	3.11 ^b	3.32 ^b	3.05 ^b	2.21 ^b	0 ^{ab}	0.05 ^{ab}	0.01 ^{ab}	1.98 ^{ab}

- Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))
- [4] 曾家俊,麦叶鹏,李志威,等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):15-21. (ZENG Jiajun,MAI Yepeng,LI Zhiwei,et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city[J]. Water Resources Protection,2020,36(3):15-21. (in Chinese))
- [5] 荣艳淑,王文,王鹏,等. 淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):1-8. (RONG Yanshu,WANG Wen,WANG Peng,et al. Analysis of characteristics of extreme rainfall and estimate of rainfall during return periods in Huaihe Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2012,40(1):1-8. (in Chinese))
- [6] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):13-18. (LI Zhijia,ZHU Yuelong,LIU Zhiyu,et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(1):13-18. (in Chinese))
- [7] 王兆礼,陈昱宏,赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护,2022,38(1):117-124. (WANG Zhaoli,CHEN Yuhong,LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):117-124. (in Chinese))
- [8] 黄金良,杜鹏飞,何万谦,等. 城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析[J]. 中国环境科学,2007,27(4):549-553. (HUANG Jinliang,DU Pengfei,HE Wanqian,et al. Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modelling[J]. Science of the Total Environment,2007,27(4):549-553. (in Chinese))
- [9] 邓鹏,李致家,郭元,等. 淮河上游地区降雨径流分析及模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(5):377-381. (DENG Peng,LI Zhijia,GUO Yuan,et al. Rainfall-runoff analysis and simulation for upstream area of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2014,42(5):377-381. (in Chinese))
- [10] 郭凤,陈建刚,杨军,等. SWMM 模拟植草沟功能的参数敏感性分析[J]. 中国给水排水,2016,32(9):131-134. (GUO Feng,CHEN Jiangang,YANG Jun,et al. Parameter sensitivity analysis of SWMM model for simulation of grass swales[J]. China Water & Wastewater,2016,32(9):131-134. (in Chinese))
- [11] 陈卫平,涂宏志,彭驰,等. 环境模型中敏感性分析方法评述[J]. 环境科学,2017,38(11):4889-4896. (CHEN Weiping,TU Hongzhi,PENG Chi,et al. Comment on sensitivity analysis methods for environmental models[J]. Environment Science,2017,38(11):4889-4896. (in Chinese))
- [12] KNIGHTON J,LENNON E,BASTIDAS L,et al. Stormwater detention system parameter sensitivity and uncertainty analysis using SWMM[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2016,21(8):05016014.
- [13] YAZDI M N,KETABCHY M,SAMPLE D J,et al. An evaluation of HSPF and SWMM for simulating streamflow regimes in an urban watershed[J]. Environmental Modelling & Software,2019,118:211-225.
- [14] BABAEI S,HAZAVI R,ERFANIAN M. Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach[J]. Physics and Chemistry of the Earth,Parts A/B/C,2018,105:3-11.
- [15] ZENG Z,YUAN X,LIANG J,et al. Designing and implementing an SWMM-based web service framework to provide decision support for real-time urban stormwater management[J]. Environmental Modelling & Software,2021,135:104887.
- [16] 张胜杰,宫永伟,李俊奇. 暴雨管理模型 SWMM 水文参数的敏感性分析案例研究[J]. 北京建筑工程学院学报,2012,28(1):45-48. (ZHANG Shengjie,GONG Yongwei,LI Junqi. Case study of hydrological parameters sensitivity analysis using SWMM[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2012,28(1):45-48. (in Chinese))
- [17] 李美水,杨晓华. 基于 Sobol 方法的 SWMM 模型参数全局敏感性分析[J]. 中国给水排水,2020,36(17):95-102. (LI Meishui,YANG Xiaohua. Global sensitivity analysis of SWMM parameters based on Sobol method[J]. China Water & Wastewater,2020,36(17):95-102. (in Chinese))
- [18] 张硕,康光宗,贺泳超,等. 基于道路 SWMM 模型的参数敏感性分析及参数率定[J]. 公路,2020,65(5):21-26. (ZHANG Shuo,KANG Guangzong,HE Yongchao,et al. Sensitivity analysis of parameters based on SWMM road model[J]. Road,2020,65(5):21-26. (in Chinese))
- [19] 马勇,顾正华,王庭辉,等. 基于 SWMM 的山丘城区防洪排涝能力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):499-505. (MA Yong,GU Zhenghua,WANG Tinghui,et al. Analysis of flood control and drainage capacity of hilly city based on SWMM[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(6):499-505. (in Chinese))
- [20] 薛宇雷. 基于 SWMM 模型对周河流域地表径流和非点源污染的研究[D]. 长安:长安大学,2018.
- [21] 李佳韵. 降雨条件下氮素随地表径流迁移转化模型研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2017.

(收稿日期:2022-10-26 编辑:刘晓艳)